poulie et l'aiguille de gauche à droite. Le mouvement contraire a lieu quand la pression diminue, parce que le mercure s'élève dans la petite branche et remonte en même temps le flotteur. Il résulte de là que l'aiguille s'arrête aux mots *variable, pluie, beau temps, beau fixe*, etc., lorsque le baromètre prend les hauteurs correspondantes, pourvu, toutefois, que l'instrument soit bien réglé; or, ceux qu'on trouve dans le commerce satisfont rarement à cette condition.

151. **Mesure des hauteurs par le baromètre.** — La pression de l'atmosphère décroissant à mesure qu'on atteint des lieux élevés, il en résulte que le baromètre baisse d'autant plus, qu'il est porté à une plus grande hauteur, ce qui permet d'utiliser cet instrument pour mesurer la hauteur des montagnes.

Si la densité de l'air restait la même dans toutes les couches de l'atmosphère, on déduirait, par un calcul très-simple, la hauteur dont on s'est élevé de la quantité dont le baromètre se serait abaissé. En effet, la densité de l'air étant 10 466 fois plus petite que celle du mercure, si le baromètre s'abaissait, par exemple, de 1 millimètre, cela indiquerait que la colonne d'air qui fait équilibre au mercure a diminué 10 466 fois plus, c'est-à-dire de 1 millimètre multiplié par 10 466, ou de $10^{m},466$. Telle serait donc la hauteur dont on se serait élevé. Si la dépression du mercure était de 2, 3... millimètres, on en conclurait de même que l'ascension aurait été de deux fois, trois fois... $10^{m},466$. Mais comme la densité de l'air décroît lorsqu'on s'élève dans l'atmosphère, le calcul ci-dessus ne peut s'appliquer qu'à de petites hauteurs.

Pour mesurer la hauteur des montagnes à l'aide du baromètre, Laplace a donné la formule

$$D = 18393\,(1 + 0{,}002837\,\cos 2\varphi)\left[1 + \frac{2\,(T+t)}{1000}\right]\log\frac{H}{h},$$

dans laquelle D désignant la distance verticale entre les deux lieux dont on cherche la différence de niveau, H représente la hauteur du baromètre à la station inférieure, et h la hauteur à la station supérieure; T et t sont les températures de l'air correspondantes à chaque observation; φ est la latitude.

Pour la latitude de 45°, $\cos 2\varphi = 0$, et la formule devient

$$D = 18393\left[1 + \frac{2\,(T+t)}{1000}\right]\log\frac{H}{h}.$$

Pour les hauteurs moindres que 1000 mètres, M. Babinet a proposé récemment la formule

$$D = 16000^{m}\left(\frac{H-h}{H+h}\right)\left[1 + \frac{2\,(T+t)}{1000}\right],$$

qui dispense de l'usage des logarithmes.

M. Oltmanns a construit des tables à l'aide desquelles on calcule très-simplement la différence de niveau entre deux stations, lorsqu'on connaît les hauteurs H et h du baromètre à la station inférieure et à la station supérieure, ainsi que les températures T

et t aux mêmes stations. On trouve ces tables et la manière de s'en servir dans les Annuaires du Bureau des longitudes.

Si la hauteur à mesurer n'est pas très-grande, on peut opérer seul; mais si elle est un peu considérable et exige un temps d'ascension un peu long, pendant lequel la pression atmosphérique peut varier, il faut être deux, et avoir deux baromètres bien d'accord. L'un des observateurs reste au pied de la montagne, l'autre se transporte au sommet; puis, à une heure donnée, ils observent simultanément le baromètre ; en sorte que la différence des colonnes est bien due tout entière à la différence des niveaux.

CHAPITRE II.

MESURE DE LA FORCE ÉLASTIQUE DES GAZ.

152. **Loi de Mariotte.** — L'abbé Mariotte, physicien français, mort en 1684, posa, le premier, la loi suivante sur la compressibilité des gaz : *La température restant la même, le volume d'une masse donnée de gaz est en raison inverse de la pression qu'elle supporte.*

Cette loi se vérifie, pour l'air, au moyen de l'appareil suivant, connu sous le nom de *tube de Mariotte*. Sur une planchette de bois, maintenue verticalement, est fixé un tube de verre recourbé en siphon, dont les deux branches sont inégales (fig. 96). Le long de la petite branche, qui est fermée, est une échelle indiquant des capacités égales, tandis que l'échelle placée le long de la grande branche indique les hauteurs en centimètres. Les zéros des deux échelles sont sur une même ligne horizontale.

Pour faire l'expérience, on verse d'abord du mercure dans l'appareil par le sommet de la grande branche, de manière que le niveau du liquide corresponde au zéro dans les deux branches (fig. 96), ce qu'on obtient après quelques tâtonnements. L'air renfermé dans la courte branche est alors soumis à la pression atmosphérique qui s'exerce, dans la grande, sur la surface du mercure, sinon le niveau ne serait pas le même. On verse enfin du mercure dans le grand tube jusqu'à ce que la pression qui en résulte réduise de moitié le volume d'air renfermé dans la petite branche, c'est-à-dire jusqu'à ce que ce volume, qui était 10 d'abord, ne soit plus que 5, ainsi que le montre la figure 97. Mesurant alors la différence de niveau CA du mercure dans les deux tubes, on trouve qu'elle est précisément égale à la hauteur du baromètre au moment où l'on expérimente. La pression de la colonne CA équivaut donc à une atmosphère. En y ajoutant la pression atmosphérique qui s'exerce en A, au sommet de la colonne, on voit qu'au mo-

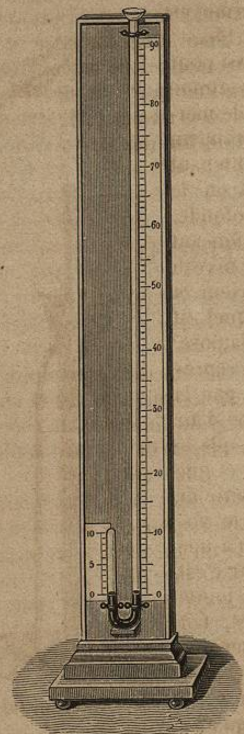

Fig. 96 (h = 1^{m}).

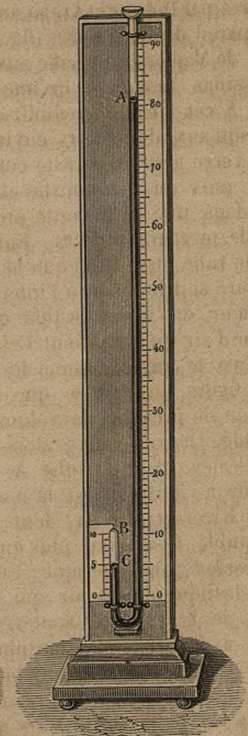

Fig. 97.

ment où le volume d'air s'est réduit de moitié, la pression est double de ce qu'elle était d'abord : ce qui démontre la loi.

Si la grande branche est assez longue pour qu'on puisse y verser du mercure jusqu'à ce que le volume d'air de la courte branche se réduise au tiers de ce qu'il était d'abord, on trouve que la différence de niveau, dans les deux tubes, est égale à deux fois la hauteur du baromètre; c'est-à-dire qu'elle équivaut à deux pressions atmosphériques, qui, s'ajoutant à celle qui s'exerce directe-

ment sur la surface du mercure dans le grand tube, donnent une pression de 3 atmosphères. C'est donc sous une pression triple que le volume d'air est devenu trois fois moindre. La loi de Mariotte a été vérifiée ainsi, pour l'air, jusqu'à 27 atmosphères, par Dulong et Arago, au moyen d'un appareil décrit ci-après (fig. 99).

La loi de Mariotte se vérifie aussi pour des pressions moindres qu'une atmosphère. A cet effet, on remplit de mercure, jusqu'aux deux tiers environ, un tube de verre gradué, le reste contenant de l'air; puis on le retourne et on le plonge dans une éprouvette profonde, pleine de mercure (fig. 98). Enfonçant ensuite le tube jusqu'à ce que le niveau du mercure soit le même à l'intérieur et à l'extérieur, on lit sur le tube quel est le volume d'air qu'il contient. Cela posé, on soulève le tube, comme le représente la figure, jusqu'à ce que, par la diminution de pression, le volume d'air soit doublé. Or, on trouve alors que le mercure s'élève dans le tube A, et que la hauteur qu'il atteint est la moitié de celle du baromètre. L'air, dont le volume a doublé, n'est donc plus qu'à une demi-pression atmosphérique ; car c'est la force élastique de cet air qui, jointe au poids de la colonne soulevée, fait équilibre à la pression atmosphérique extérieure. Le volume est donc bien encore en raison inverse de la pression.

Fig. 98.

153. **La loi de Mariotte n'est qu'approchée.** — On avait admis, jusqu'à ces dernières années, la loi de Mariotte d'une manière absolue pour tous les gaz et à toutes les pressions. M. Despretz fit voir, le premier, que l'acide carbonique, l'hydrogène sulfuré, l'ammoniaque et le cyanogène sont plus compressibles que l'air, et que l'hydrogène, se comportant d'abord comme l'air jusqu'à une pression de 15 atmosphères, est ensuite moins compressible. Les expériences de M. Despretz ayant fait voir que tous les gaz ne sont pas également compressibles, on en conclut que la loi de Mariotte n'était pas générale.

Cette loi venait ainsi d'être trouvée en défaut, quand Dulong et Arago entreprirent sur la force élastique de la vapeur d'eau des recherches dans lesquelles ils devaient faire usage d'un manomètre à air comprimé (158) pour mesurer la tension. Or, voulant à ce sujet s'assurer de l'exactitude de leur manomètre, ils le graduèrent, non pas d'après la loi de Mariotte, mais en soumettant directement l'air renfermé dans le manomètre à des pressions de plus en plus grandes. Pour cela, ils disposèrent leur appareil comme le montre la figure 99. Un réservoir P, tout de fonte, porte latéralement deux tubulures Q, R, de même matière. Dans la première est scellé le tube manométrique A, de près de 2 mètres de long; ce tube est rempli d'air sec, et entouré d'un manchon de verre dans lequel tombe un courant d'eau froide pour maintenir la température constante, malgré l'élévation de température que tend à prendre l'air qui est dans le tube en se comprimant. Sur la seconde tubulure est fixée une série de treize tubes de cristal B, B', B'',..., de chacun deux mètres de longueur, et reliés entre eux au moyen de garnitures de fer.

Ces tubes étaient appliqués le long de forts madriers de sapin, et pour qu'ils n'exerçassent pas de pression les uns sur les autres, à chaque garniture, comme on le voit en O, étaient attachés deux cordeaux s'enroulant sur des poulies, lesquelles étaient portées par les madriers mêmes qui soutenaient tous les tubes. A ces cordeaux étaient suspendus de petits seaux, *p*, *p*, chargés de grenaille de plomb, et faisant équilibre, deux par deux, à un tube et à sa garniture. Enfin, sur le réservoir P était adaptée une pompe aspirante et foulante, qui aspirait de l'eau d'un vase S et la refoulait dans le réservoir P. Or, celui-ci ayant été d'avance rempli de mercure jusqu'aux deux tiers environ, lorsqu'on faisait marcher la pompe, la pression transmise par l'eau au mercure refoulait ce dernier dans les tubulures Q et R; en sorte qu'il s'élevait en même temps dans les tubes B, B', B'',.... et dans le manomètre A, absolument comme dans l'expérience du tube de Mariotte, dont les tubes B, B', B'',.... figuraient la grande branche, et le tube manométrique la petite. A mesure que le volume d'air se réduisait ainsi dans le tube A, la hauteur du mercure dans les tubes B, B', B'',.... faisait connaître la pression correspondante.

Cette hauteur se mesurait au moyen de règles divisées en millimètres et munies de verniers, qu'on portait le long des tubes, en les appliquant sur des points de repère tracés sur les garnitures de jonction.

Dulong et Arago ayant expérimenté jusqu'à 27 atmosphères, observèrent que le volume de l'air diminuait toujours un peu plus

dans le tube A que ne l'indiquait la loi de Mariotte; mais les différences étant très-petites, ils les attribuèrent à des erreurs d'ob-

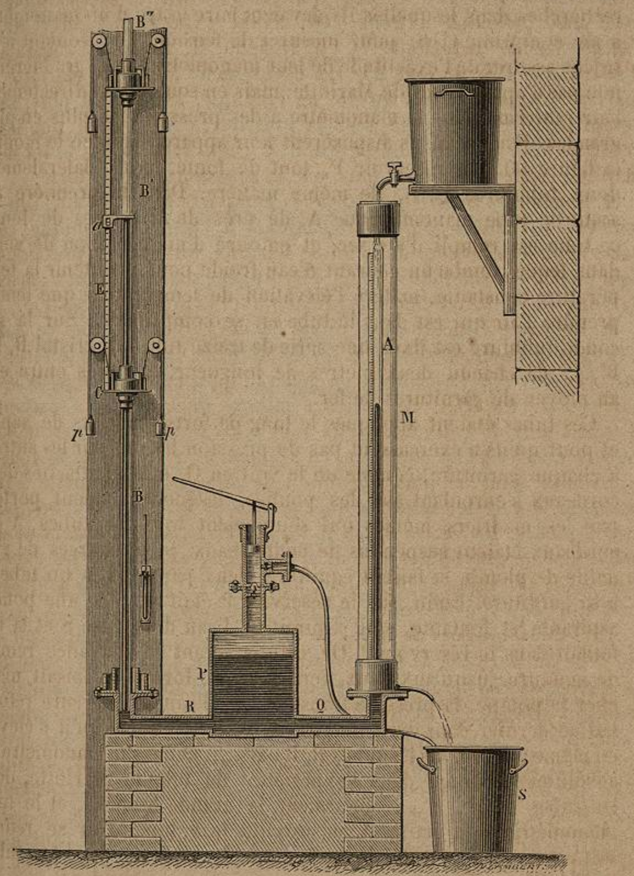

Fig. 99.

servation, et admirent que cette loi était rigoureusement exacte pour l'air, du moins jusqu'à 27 atmosphères de pression, limite de leurs expériences.

Enfin, M. Regnault, en 1847, publia des expériences sur la compressibilité des gaz faites avec un appareil qui avait beaucoup de rapport avec celui de Dulong et Arago, mais dans lequel on avait tenu compte de toutes les causes d'erreur et fait les observations avec une précision extrême. Or, ayant expérimenté sur l'air, l'azote, l'acide carbonique et l'hydrogène, M. Regnault constata d'abord que l'air ne suit pas rigoureusement la loi de Mariotte, mais se comprime plus qu'elle ne l'indique, et que, de plus, sa compressibilité augmente avec la pression ; c'est-à-dire que les résultats obtenus par l'observation et ceux déduits de la loi de Mariotte diffèrent d'autant plus, que la pression est plus forte.

M. Regnault a trouvé que l'azote se comporte comme l'air ; seulement il est moins compressible. Quant à l'acide carbonique, ce gaz s'éloigne beaucoup de la loi de Mariotte, lorsque les pressions sont un peu considérables. Enfin, l'hydrogène s'en écarte aussi ; mais sa compressibilité, au lieu d'augmenter avec la pression, diminue.

M. Regnault a encore observé sur l'acide carbonique que ce gaz s'éloigne d'autant moins de la loi de Mariotte, que la température est plus élevée, et l'on admet, en général, qu'il en est ainsi pour les autres gaz. En effet, l'expérience montre que les gaz s'écartent d'autant plus de cette loi, qu'ils sont plus près de leur point de liquéfaction, et qu'au contraire, en s'éloignant de ce point, la compressibilité tend de plus en plus à devenir proportionnelle à la pression. Du reste, ajoutons que, pour tous les gaz qui n'ont pu être liquéfiés, les écarts entre la loi de Mariotte et l'observation sont extrêmement faibles et tout à fait négligeables dans les expériences de physique et de chimie, lorsqu'on n'y considère que des pressions peu considérables, comme c'est le cas ordinaire.

154. **Conséquences de la loi de Mariotte.** — Dans l'expérience du tube de Mariotte, la masse d'air renfermée dans le tube restant la même, sa densité devient nécessairement d'autant plus grande, que son volume est réduit davantage ; d'où l'on déduit, comme conséquence de la loi de Mariotte, le principe suivant, qui n'en est qu'un autre énoncé : *Pour une même température, la densité d'un gaz est proportionnelle à la pression qu'il supporte.* Par exemple, sous la pression ordinaire de l'atmosphère, la densité de l'air étant 773 fois moindre que celle de l'eau (129), sous une pression de 773 atmosphères, l'air aurait la même densité que l'eau, si à une telle pression il était encore gazeux ; ce qu'on ignore.

On peut encore énoncer la loi de Mariotte, en disant que pour une masse de gaz donnée, prise à la même température, *le produit du volume par la pression est constant.*

En effet, soient V le volume à la pression P, et V′ le volume à la pression P′ ; d'après la loi de Mariotte, on a $\frac{V}{V'}=\frac{P'}{P}$, d'où $VP = V'P'$.

155. **Problèmes sur la loi de Mariotte.** — I. Un vase à parois compressibles contient $4^{lit},3$ d'air, la pression étant $0^{m},74$; quel serait le volume d'air à la pression $0^{m},76$, la température restant la même ?

Le volume d'air étant $4^{lit},3$ à la pression $0^{m},74$, il serait, d'après la loi de Mariotte, 74 fois plus grand à la pression $0^{m},01$, ou $4^{lit},3 \times 74$; et, d'après la même loi, il sera 76 fois plus petit à la pression $0^{m},76$, c'est-à-dire

$$\frac{4,3 \times 74}{76} = 4^{lit},186.$$

II. On a 20 litres de gaz sous la pression d'une atmosphère : à quelle pression, en atmosphères, doit être soumis ce volume pour se réduire à 8 litres ?

Pour réduire le volume de 20 litres à un seul, il faudrait, d'après la loi de Mariotte, une pression 20 fois plus grande, ou 20 atmosphères ; pour l'amener ensuite d'un seul litre à 8, il faut une pression 8 fois plus petite, c'est-à-dire, $\frac{20}{8} = 2$ atmosphères $\frac{1}{2}$.

III. Un litre d'air pèse $1^{gr},293$ à zéro et sous la pression 76^{c} de mercure ; que serait le poids, à volume égal, de V litres d'air à la pression H ?

Un litre d'air, pesant $1^{gr},293$ à la pression 76^{c}, pèse $\frac{1^{gr},293}{76}$ à la pression 1^{c} et $\frac{1^{gr},293 \times H}{76}$ à la pression H ; donc le poids P de V litres, à zéro et à la pression H, est $P = \frac{1^{gr},293 \times H \times V}{76}$.

IV. La densité d'un gaz est d à la pression barométrique H ; quelle sera sa densité d' à la pression $0^{m},76$?

Les densités des gaz, comme leurs poids, étant directement proportionnelles aux pressions, on a $\frac{d'}{d} = \frac{0^{m},76}{H}$, d'où $d' = \frac{d \times 0,76}{H}$.

156. **Manomètres.** — On donne le nom de *manomètres* à des instruments destinés à mesurer la tension des gaz ou des vapeurs. On distingue le *manomètre à air libre*, le *manomètre à air comprimé* et le *manomètre métallique*.

Dans ces différents genres de manomètres, l'unité de mesure qu'on a choisie est la pression atmosphérique, lorsque le baromètre est à $0^{m},76$. Or, on a vu (138) que cette pression, sur un centimètre carré, équivaut au poids de $1^{kil},033^{gr}$; par conséquent, si l'on dit d'un gaz qu'il a une tension de 2, de 3 atmosphères, cela signifie que sa tension ferait équilibre au poids d'une colonne de mercure de deux fois, trois fois 76 centimètres de hauteur ; ou, en d'autres termes, qu'il exerce, sur chaque centimètre carré des parois qui le contiennent, une pression égale à deux fois ou trois fois le poids de $1^{kil},033^{gr}$.

157. **Manomètre à air libre.** — Le *manomètre à air libre* se compose d'un tube de cristal BD (fig. 100), long de 5 mètres environ, et d'une cuvette D, de fer forgé, contenant du mercure dans lequel plonge le tube. Celui-ci, qui est ouvert aux deux bouts,

est solidement mastiqué à la cuvette, et fixé sur une planche de sapin le long de laquelle est un deuxième tube de fer AC, haut de 4 mètres. C'est par ce tube que la pression du gaz ou de la vapeur se transmet jusqu'au mercure de la cuvette. Les manomètres fonctionnant le plus souvent avec de la vapeur, dont la température élevée ramollirait le mastic qui sert à fixer le tube de cristal à la cuvette, on remplit d'eau le tube AC, et c'est celle-ci qui reçoit directement la pression de la vapeur et la transmet au mercure.

Pour graduer le manomètre, on laisse l'orifice A communiquer avec l'atmosphère, et, au niveau où le mercure s'arrête alors dans le tube de cristal, on marque le chiffre 1, c'est-à-dire une atmosphère; puis, à partir de ce point, de 76 en 76 centimètres, on marque les chiffres 2, 3, 4, 5, 6, qui indiquent le même nombre d'atmosphères, puisqu'on sait qu'une colonne de mercure de 76 centimètres représente une pression atmosphérique. On partage enfin les intervalles de 1 à 2, de 2 à 3..., en dix parties égales, qui donnent les dixièmes d'atmosphère.

Le tube A étant ensuite mis en communication, par exemple, avec une chaudière à vapeur, le mercure s'élève, dans le tube BD, à une hauteur qui mesure la tension de la vapeur. Dans le dessin, le manomètre marque 4 atmosphères, qui sont représentées par 3 fois la hauteur 76 centimètres, plus la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet de la colonne.

Le manomètre à air libre n'est en usage que pour des pressions qui ne dépassent pas 5 à 6 atmosphères. Au delà, il faudrait donner au tube BD une longueur qui le rendrait aussi fragile qu'embarrassant. On a recours alors au manomètre suivant.

158. **Manomètre à air comprimé.** — Le *manomètre à air comprimé*, fondé sur la loi de Mariotte, se compose d'un tube de cristal fermé à son extrémité supérieure et rempli d'air sec. Ce tube plonge dans une cuvette de fer, en partie pleine de mercure, à laquelle il est mastiqué. Celle-ci, par une tubulure latérale A (fig. 101), est mise en communication avec le vase clos qui contient le gaz ou la vapeur dont il s'agit de mesurer la force élastique.

Quant à la graduation de ce manomètre, on peut l'obtenir par l'expérience ou par le calcul. On le gradue expérimentalement en comparant sa marche à celle d'un manomètre à air libre. Pour cela, ayant réglé la quantité d'air dans le tube, de manière qu'à la pression d'une atmosphère, le niveau du mercure y soit le même que dans la cuvette, on fait communiquer l'instrument, en même temps que le manomètre à air libre auquel on veut le comparer,

avec un récipient dans lequel on comprime lentement de l'air au moyen d'une pompe foulante. Le mercure s'élevant alors dans les deux instruments, à mesure que le manomètre à air libre marque successivement 1, 2, 3... atmosphères, on inscrit les mêmes nombres, au niveau du mercure, sur une échelle placée le long du tube manométrique. L'instrument se trouve ainsi gradué avec exactitude, que le tube en soit ou non de même diamètre dans toute sa longueur.

On peut aussi graduer le manomètre à air comprimé par le calcul suivant, qui suppose que le tube est partout de même diamètre. Soit d'abord le cas où le diamètre intérieur de la cuvette est assez grand pour qu'on puisse admettre que le niveau y reste sensiblement constant, lorsque le mercure s'élève dans le tube. Le manomètre étant mis en communication avec un récipient qui contient un gaz comprimé, soient F la tension en centimètres dans ce vase, h la hauteur du tube manométrique à partir du niveau du mercure dans la cuvette, et x la hauteur à laquelle s'élève le mercure par l'effet de la pression F.

La pression extérieure étant d'abord d'une atmosphère, ou 76 centimètres, le volume d'air dans le tube manométrique peut être représenté par h; mais la pression extérieure devenant F, le volume d'air se réduit à $h-x$; il est donc alors plus comprimé, et acquiert une tension f qu'on calcule, d'après la loi de Mariotte, en posant

$$\frac{f}{76}=\frac{h}{h-x},$$

d'où $f=\dfrac{76\,h}{h-x}$.

Or, F faisant équilibre à la colonne de mercure x et à l'élasticité f de l'air comprimé, on a

$$F=\frac{76\,h}{h-x}+x \quad [1];$$

d'où l'on tire les deux valeurs

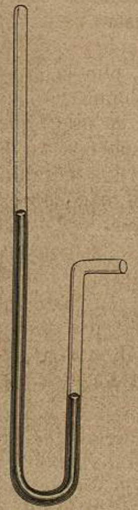

Fig. 102.

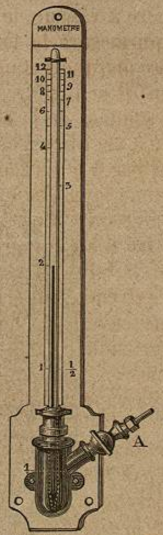

Fig. 101 (h = 80).

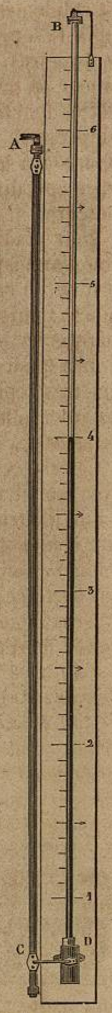

Fig. 100 (h = 4^{m},80).

$$x'=\frac{(F+h)+\sqrt{(F+h)^2-4h\,(F-76)}}{2}, \quad [2]$$

$$x''=\frac{(F+h)-\sqrt{(F+h)^2-4h\,(F-76)}}{2}. \quad [3]$$

La seconde est la seule qui satisfasse à la question, car en y faisant $F = 76$, il vient $x = 0$, ce qui est exact; tandis qu'en donnant la même valeur à F dans l'équation [2], on trouve $x' = h + 76$, valeur impossible, puisque x est nécessairement $< h$. En posant successivement $F = 2.76$, $F = 3.76$,.... dans l'équation [3], on obtient les hauteurs auxquelles on doit inscrire, sur l'échelle, les nombres 2, 3, 4,.... atmosphères, à partir du niveau dans la cuvette.

Si actuellement on veut tenir compte de la dépression du mercure dans la cuvette, soient x' cette dépression, R le rayon intérieur de la cuvette, r celui du tube manométrique, et x l'ascension du mercure dans ce dernier. L'ascension et la dépression du mercure étant en raison inverse des sections du tube et de la cuvette, ou, ce qui est la même chose, en raison inverse des carrés des rayons de ces mêmes sections, on a $\frac{x'}{x} = \frac{r^2}{R^2}$, d'où $x' = \frac{r^2 x}{R^2}$.

Fig. 103.

Cela posé, la différence de niveau dans le tube et dans la cuvette étant actuellement $x + x'$, la tension F fait équilibre à une colonne de mercure $x + x'$, plus à la force élastique de l'air comprim dans le tube, laquelle est encore $\frac{76h}{h-x}$. On a donc $F = x + x' + \frac{76h}{h-x}$. En remplaçant x' par sa valeur et réduisant, $F = \frac{(R^2 + r^2)x}{R^2} + \frac{76h}{h-x}$. [4]

Dans le cas où le manomètre consisterait simplement en un tube recourbé, fermé à son extrémité supérieure et contenant du mercure (fig. 102), on aurait $R = r$, et alors la formule [4] devient

$$F = 2x + \frac{76h}{h-x}. \quad [5]$$

159. **Manomètre barométrique de M. Regnault.** — Pour mesurer les tensions moindres que la pression atmosphérique, M. Regnault a adopté un manomètre qui n'est qu'une modification de son baromètre fixe déjà décrit (142). A côté du tube barométrique est un second tube a d'égal diamètre, plongeant dans la même cuvette (fig. 103). Ce tube, ouvert à ses deux bouts, est en communication à sa partie supérieure avec une tubulure à trois branches m, laquelle communique d'une part avec une machine pneumatique, de l'autre avec l'appareil où l'on veut faire le vide. Plus la raréfaction est poussée loin dans celui-ci, plus le mercure s'élève dans le tube a; en sorte que c'est la différence de niveau dans les tubes b et a qui fait connaître la tension. Il n'y a donc qu'à mesurer la hauteur ab à l'aide du cathétomètre, pour avoir avec précision la force élastique du gaz ou de la vapeur dans l'appareil où l'on fait le vide. Cet appareil se désigne aussi sous le nom de *baromètre différentiel.*

160. **Manomètre de Bourdon.** — M. Bourdon, mécanicien à Paris, a inventé, il y a quelques années, un nouveau manomètre que représente la figure 104. Cet instrument, qui est entièrement métallique et sans mercure, est construit d'après le principe suivant, fondé sur la déformation qu'éprouvent les tubes par la pression. Lorsqu'un tube à parois flexibles et légèrement aplaties sur elles-mêmes est enroulé en spirale, dans le sens de son plus petit diamètre, *toute pression intérieure sur les parois a pour effet de dérouler le tube, et, au contraire, toute pression extérieure a pour effet de l'enrouler davantage.*

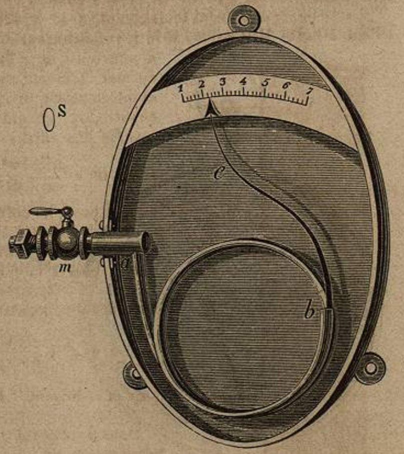

Fig. 104 ($h = 26$).

D'après ce principe, le manomètre de M. Bourdon se compose d'un tube de laiton recourbé, long de $0^m,70$, dont les parois sont minces et flexibles Sa section, qui est représentée en S sur la gauche de la figure, est une ellipse dont le grand axe est de 11 millimètres et le petit de 4. L'extrémité a, qui est ouverte, est fixée à une tubulure à robinet m, destinée à mettre l'appareil en communication avec une chaudière à vapeur. L'extrémité b est fermée et libre, ainsi que tout le reste du tube.

Le robinet m étant ouvert, la pression qui se produit, en vertu de la tension de la vapeur, sur l'intérieur des parois du tube, le fait se dérouler. L'extrémité b est alors entraînée de gauche à droite, et avec elle une longue aiguille e, qui indique sur un cadran la tension de la vapeur en atmosphères. Ce cadran se gradue d'avance comparativement à un manomètre à air libre, en faisant marcher l'appareil avec de l'air comprimé.

Le manomètre de M. Bourdon offre le précieux avantage, sur les précédents, d'être très-portatif et nullement fragile; aussi fonctionne-t-il sur les locomotives de plusieurs chemins de fer.

* 161. **Baromètre métallique de Bourdon.** — M. Bourdon est l'inventeur d'un baromètre métallique fondé sur le même principe que son manomètre. Cet appareil, que représente la figure 105, se compose d'un tube semblable à celui du manomètre ci-dessus, mais moins long, hermétiquement fermé, et fixé seulement en son milieu; en sorte que, le vide y ayant été fait d'avance, toutes les fois que la pression atmosphérique diminue, ce tube se déroule en vertu du principe énoncé plus haut (160). Le mouvement se communique ensuite à une aiguille qui indique la pression sur un cadran. Quant à la transmission de mouvement, elle a lieu au moyen de deux petits fils métalliques *b* et *a*, qui lient les extrémités du tube à un levier fixé à l'axe de l'aiguille. Si, au contraire, la pression augmente, le tube se ferme sur lui-même, et c'est un petit ressort en spirale *c* qui ramène alors l'aiguille de gauche à droite au-dessus du cadran. Ce baromètre est d'un très-petit volume, très-sensible, et remarquable par son extrême simplicité.

Fig. 105 (h = 10).

162. **Lois des mélanges des gaz.** — On a vu, dans les mélanges des liquides, que ceux-ci tendent à se séparer, et ne peuvent ensuite demeurer en équilibre que lorsqu'ils sont superposés par ordre de densités croissantes de haut en bas (88), la surface de séparation des différents liquides étant horizontale. Les gaz, en vertu de leur force expansive, présentent, lorsqu'on les mélange, d'autres conditions d'équilibre, qui sont les deux suivantes :

1° *Le mélange, qui s'opère toujours rapidement, est homogène et persistant, en sorte que toutes les parties du volume total contiennent la même proportion de chacun des gaz mélangés, quelle que soit leur densité.*

2° *La température étant constante, la force élastique du mélange est toujours égale à la somme des forces élastiques des gaz mélangés, rapportés chacun au volume total, d'après la loi de Mariotte.*

Cette seconde loi peut encore s'énoncer en disant que, *dans un mélange de plusieurs gaz, la pression exercée par chacun d'eux est la même que s'il était seul.*

La première loi est une conséquence de l'extrême porosité des gaz et de leur force expansive. Elle a été démontrée, pour la première fois, par le chimiste français Berthollet, au moyen de l'appareil représenté dans la figure 106, lequel se compose de deux ballons de verre munis chacun d'un robinet et vissés l'un sur l'autre. Le ballon supérieur était rempli d'hydrogène, dont la densité est 0,0692, et l'autre de gaz acide carbonique, dont la densité est 1,529, c'est-à-dire 22 fois plus grande. L'appareil fut placé dans les caves de l'Observatoire, pour le préserver de toute agitation et des variations de température. Les robinets ayant été ouverts, l'acide carbonique, malgré son excès de poids, passa en partie dans le ballon supérieur, et, au bout de peu de temps, on constata que les deux ballons contenaient des proportions égales d'hydrogène et d'acide carbonique. Soumis à la même expérience, tous les gaz qui n'ont pas entre eux d'action chimique donnent le même résultat, et l'on remarque que le mélange s'opère d'autant plus rapidement, que la différence des densités est plus grande.

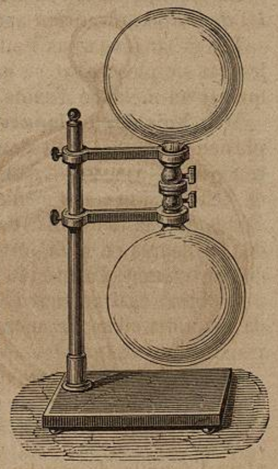

Fig. 106.

La deuxième loi est une conséquence de la loi de Mariotte. Pour la vérifier, soient v, v', v'', les volumes de trois gaz sans action chimique les uns sur les autres, f, f', f'', leurs tensions respectives, et V le volume du vase dans lequel on les mélange. Le premier gaz, passant du volume v au volume V, acquiert une élasticité x telle, que, d'après la loi de Mariotte, on a $\frac{x}{f} = \frac{v}{V}$, d'où $x = \frac{fv}{V}$. De même, la pression du second gaz devient $\frac{f'v'}{V}$, et celle du troisième $\frac{f''v''}{V}$. En représentant par F la somme de ces trois forces élastiques, on a

$$F = \frac{fv + f'v' + f''v''}{V}; \quad [1]$$

telle doit donc être aussi la force élastique du mélange. En effet, supposons que le vase dans lequel on a fait passer les trois gaz soit une cloche graduée pleine de mercure, assez grande pour qu'ils ne la remplissent pas tout à fait; en représentant par h la hauteur du mercure qui reste encore dans la cloche après qu'on y a fait passer les gaz, et par H la hauteur barométrique au moment de l'expérience, $H - h$ sera la pression supportée par le mélange dans la cloche. Or, la température restant constante, on observe toujours que la valeur de $H - h$ est la même que celle de F obtenue par la formule [1] ci-dessus ; ce qui vérifie la loi.

Dans le cas où $f = f' = f''$, et où $V = v + v' + v''$, on a

$$F = \frac{f\,(v + v' + v'')}{v + v' + v''} = f.$$

C'est-à-dire que la pression du mélange est la même que celle des gaz avant d'être mélangés; c'est ce qui avait lieu dans l'expérience de Berthollet.

La seconde loi du mélange des gaz est connue sous le nom de *loi de Dalton*, physicien anglais, qui, le premier, l'a fait connaître.

Les mélanges gazeux sont soumis à la loi de Mariotte de même que les gaz simples ; c'est ce qui a été déjà constaté pour l'air (152), qui est un mélange d'azote et d'oxygène.

163. **Lois des mélanges des gaz et des liquides.** — L'eau et plusieurs liquides sont doués de la propriété de se laisser pénétrer par les gaz. Mais, dans les mêmes conditions de température et de pression, un même liquide n'absorbe pas des quantités égales de gaz différents. Par exemple, à la température moyenne de 10 degrés et à la pression $0^m,76$, l'eau dissout 25 millièmes de son volume d'azote, 46 millièmes du même volume d'oxygène, un volume égal au sien d'acide carbonique, et 450 fois son volume de gaz ammoniac. Le mercure paraît se refuser entièrement à la pénétration des gaz.

L'expérience démontre que les mélanges des gaz et des liquides sont soumis aux trois lois suivantes :

1° *Pour un même gaz, un même liquide et une même température, le poids de gaz absorbé est proportionnel à la pression,* ce qui revient à dire qu'à toutes les pressions, le volume dissous est le même ; ou encore que la densité du gaz absorbé est dans un rapport constant avec celle du gaz extérieur non absorbé.

2° *La quantité de gaz absorbée est d'autant plus grande, que la température est plus basse,* c'est-à-dire que la force élastique du gaz est moindre.

3° *La quantité de gaz qu'un liquide peut dissoudre est indépendante de la nature et de la quantité des autres gaz qu'il tient déjà en dissolution.*

En effet, si au lieu d'un seul fluide élastique, l'atmosphère supérieure au liquide en contient plusieurs, on trouve que chacun de ces gaz, quel qu'en soit le nombre, se dissout dans la même proportion que s'il était seul, en tenant compte toutefois de la pression qui lui est propre. Par exemple, l'oxygène ne formant sensiblement que $\frac{1}{5}$ de l'air, l'eau, dans les conditions ordinaires, absorbe précisément la même quantité d'oxygène que si l'atmosphère était tout entière formée de ce gaz, sous une pression égale à $\frac{1}{5}$ de celle de l'atmosphère.

D'après la première loi, lorsque la pression diminue, la quantité de gaz dissoute doit décroître. C'est ce qu'on vérifie en plaçant une dissolution gazeuse sous la cloche de la machine pneumatique et en faisant le vide : on voit le gaz obéir à sa force expansive et se dégager en bulles. On obtient le même effet par l'élévation de température, car la force élastique du gaz dissous augmente ; ou encore, lorsque la dissolution gazeuse est placée dans une atmosphère indéfinie qui ne contient pas les gaz en dissolution. En effet, ceux-ci se dégagent alors comme ils le feraient dans le vide, la pression exercée par des gaz autres que ceux déjà dissous étant sans effet.

164. **Coefficient d'absorption.** — On nomme *coefficient d'absorption* ou *de solubilité* d'un gaz par rapport à un liquide, *le rapport du volume de gaz qui se dissout au volume du liquide,* le gaz et le liquide étant tous les deux à la température de zéro, et le volume du gaz absorbé étant ramené à la pression qu'il exerce sur le liquide.

Le coefficient d'absorption varie avec les gaz et les liquides, mais pour un même gaz et un même liquide, si la température est constante, il est invariable quelle que soit la pression. Toutefois, si le volume du gaz absorbé est constant, il n'en est pas de même de son poids, qui est toujours proportionnel au coefficient d'absorption du gaz, à sa densité et à la pression.

165. **Problème sur les mélanges des gaz et des liquides.**—Comme application de la première loi des mélanges des gaz et des liquides, soit proposé de calculer quelle est la composition, en volume, de l'air en dissolution dans l'eau, à la température moyenne de 10 degrés, le coefficient d'absorption de l'oxygène à cette température étant 0,046, et celui de l'azote 0,025. Pour cela, soit H la pression atmosphérique . l'air contenant, sur 100 parties en volume, 21 parties d'oxygène et 79 d'azote, la pression de l'oxygène, considéré seul, est $\frac{21\,H}{100}$, et celle de l'azote $\frac{79\,H}{100}$. Les volumes de ces deux gaz contenus dans l'eau sont donc entre eux comme les produits $\frac{21\,H}{100} \times 0,046$ et $\frac{79\,H}{100} \times 0,025$; ou, en effectuant les calculs et simplifiant, comme les nombres 966 et 1975. Or, la somme de ces deux nombres étant 2941, si l'on représente par x le volume d'oxygène contenu dans 100 parties d'air dissous, on a $\frac{x}{100} = \frac{966}{2941}$, d'où $x = 32,84$. L'air dissous dans l'eau est donc beaucoup plus riche en oxygène que l'air atmosphérique, puisqu'il en contient près de 33 pour 100.

166. **Équilibre des fluides dont les diverses parties n'ont pas la même densité.** — L'équilibre ne peut exister dans une masse fluide, soit liquide, soit gazeuse, qu'autant que la pression étant la même sur tous les points de chaque tranche horizontale (80), il en est de même de la densité ; autrement, les parties les moins denses s'élè-

vent dans la masse fluide, à la manière des corps flottants (97), et les plus denses s'abaissent. Par conséquent, pour qu'une masse fluide demeure en équilibre, il faut : 1° que *la densité soit la même pour tous les points d'une couche horizontale;* 2° pour que l'équilibre soit stable, *les couches fluides doivent être disposées par ordre de densités croissantes de haut en bas* (88).

Or, les gaz et les liquides étant très-dilatables par l'action de la chaleur, leur densité décroît quand la température augmente; par conséquent, la deuxième condition ci-dessus ne peut être satisfaite, pour les liquides du moins, qu'autant que les couches inférieures sont plus froides que les couches supérieures. Mais pour les gaz, qui sont très-compressibles, il n'est pas nécessaire que les couches supérieures soient plus chaudes que les couches inférieures ; car ces dernières, étant plus comprimées, tendent à être plus denses. Il suffit donc que la densité augmente plus par l'effet de la pression dans les couches inférieures qu'elle ne décroît par l'élévation de la température : c'est ce qui a lieu, en général, dans l'atmosphère.

Les courants qui naissent dans une masse fluide par l'effet des différences de densité dues aux différences de température d'une couche à l'autre, ont reçu leur application dans le tirage des cheminées et dans les appareils de chauffage par circulation d'eau chaude. Nous donnerons ces applications (liv. VI, chap. XI) après avoir fait connaître la dilatation des liquides et des gaz.

CHAPITRE III.

PRESSIONS SUPPORTÉES PAR LES CORPS PLONGÉS DANS L'AIR, AÉROSTATS.

167. **Principe d'Archimède appliqué au gaz.** — On a déjà vu (131) que les mêmes raisonnements qui ont conduit au principe d'Archimède pour les liquides sont, mot à mot, applicables aux gaz ; d'où l'on conclut que *tout corps plongé dans l'atmosphère y perd une partie de son poids égale au poids de l'air qu'il déplace.*

Cette perte de poids dans l'air se démontre au moyen du *baroscope.* On nomme ainsi un appareil qui consiste en un fléau de balance portant à l'une de ses extrémités une petite masse de plomb, et à l'autre une sphère de cuivre creuse, dont le volume est environ d'un demi-décimètre cube (fig. 107). Dans l'air, les deux corps se font équilibre ; mais si l'on place l'appareil sous le récipient de la

machine pneumatique, et si l'on fait le vide, on voit le fléau incliner vers la grosse sphère, ainsi que le montre la figure ci-dessous, ce qui indique qu'en réalité elle pèse plus que la petite masse de plomb ; car actuellement elles ne supportent l'une et l'autre aucune pression, et n'obéissent qu'à la pesanteur. Donc, dans l'air, la sphère perdait une certaine partie de son poids. Si l'on veut vérifier, à l'aide du même appareil, que cette perte est bien égale au poids de l'air déplacé, on mesure le volume de la sphère, que nous supposerons égal à un demi-litre. Le poids d'un pareil volume d'air étant 0gr,65 (128), on attache un poids égal à la petite masse de plomb : l'équilibre, qui avait lieu auparavant dans l'air, est alors rompu; mais dans le vide il se rétablit.

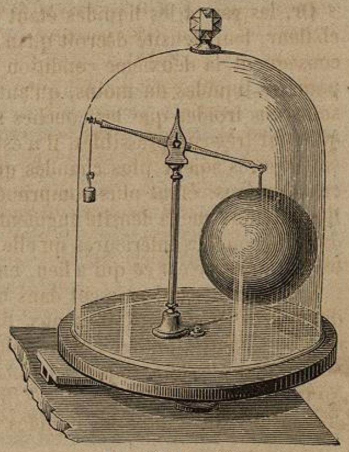

Fig. 107 (h = 20).

Le principe d'Archimède étant vrai pour les corps plongés dans l'air, on peut leur appliquer tout ce qui a été dit des corps plongés dans les liquides (97), c'est-à-dire que lorsqu'un corps est plus pesant que l'air, il tombe, en vertu de l'excès de son poids sur la poussée du fluide. S'il est de même densité que l'air, son poids et la poussée de bas en haut se font équilibre, et le corps flotte dans l'atmosphère. Enfin, si le corps est moins dense que l'air, c'est la poussée qui l'emporte, et le corps s'élève dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'il rencontre des couches d'air de même densité que lui. La force d'ascension est alors égale à l'excès de la poussée sur le poids du corps. Telle est la cause qui fait que la fumée, les vapeurs, les nuages, les aérostats, s'élèvent dans l'atmosphère.

168. **Correction des pesées faites dans l'air.** — On vient de voir que les corps perdent dans l'air une partie de leur poids égale au poids de l'air qu'ils déplacent ; par suite, lorsqu'on pèse un corps dans une balance, ce n'est pas son poids réel, c'est-à-dire dans le vide, qu'on obtient, mais seulement son poids aprent ; à moins toutefois que le volume du corps ne soit précisément le même que celui des poids gradués qui lui font équilibre, car alors il y a perte égale des deux côtés.

Pour déduire du poids apparent d'un corps son poids réel, soient p son poids réel en kilogrammes, et d sa densité. $\frac{p}{d}$ sera le volume du corps en litres, d'après